

Хомутов М.Г., Солонин А.Н.  
НИТУ «МИСиС»,  
г. Москва  
*khomutov@misis.ru*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ ТЕЧЕНИЯ ОТ ПАРАМЕТРОВ ТЕРМОДЕФОРМАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Al-Mg\***

Одним из методов повышения механических свойств алюминиевых сплавов является термомеханическая обработка. Разработка новых режимов термомеханической обработки алюминиевых сплавов затратна по времени и ресурсам. В свою очередь комплексные математические модели зависимостей механических и физических свойств от структурных и технологических параметров обработки материала, помогает значительно упростить и ускорить разработку новых режимов обработки сплавов для повышения их прочностных показателей.

Объектами исследования являлись сплавы системы Al-Mg: 1 – Al – 0,8 масс.% Mg; 2 – Al – 1,4 масс.% Mg; Al – 3,8 масс.% Mg.

Кривые истинное напряжение – истинная деформация получали при температурах 100, 150 и 200 °С и с начальными скоростями деформации 0,01 с<sup>-1</sup>, 0,1 с<sup>-1</sup>, 1 с<sup>-1</sup>, 10 с<sup>-1</sup>. На рис. 1 приведен пример первичных кривых деформации для сплава 1 при скорости деформации 0,01 с<sup>-1</sup> при разных температурах. При анализе кривых можно увидеть, что влияние температуры и скорости деформации достаточно существенно. Кривые, как правило, показывают стабильную рабочую область, сопровождаемую процессами динамического возврата, полигонизации и рекристаллизации. Упрочнение преобладает при низких температурах и при высоких скоростях деформации. Соответственно, развитие динамического разупрочнения в большей степени проявляются при повышенных температурах и при малых скоростях деформации.

---

\* Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ.

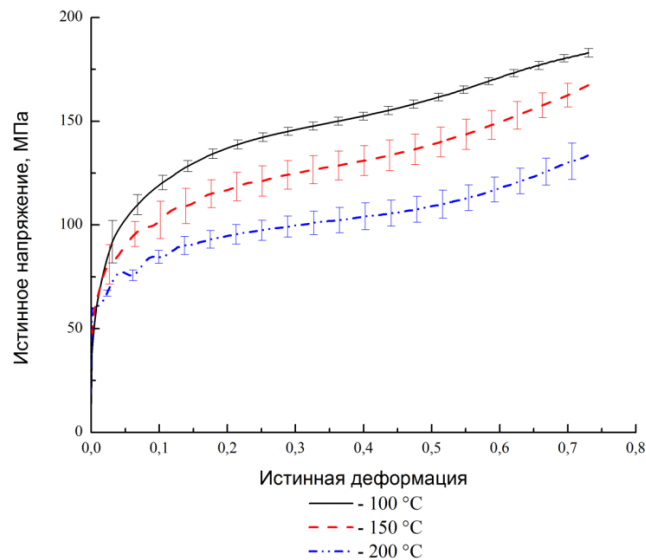


Рис. 1. Кривые истинное напряжение – истинная деформация сплава 1 при скорости деформации  $0,01 \text{ с}^{-1}$

Влияние температуры и скорости деформации может быть найдено с использованием параметра Зинера – Холломоуна с помощью классического экспоненциального уравнения, представленного ниже :

$$Z = \varepsilon' \exp\left(\frac{Q}{R \cdot T}\right), \quad (1)$$

$$\varepsilon' = A \cdot F(\sigma) \cdot \exp\left(\frac{-Q}{R \cdot T}\right), \quad (2)$$

$$F(\sigma) = \begin{cases} \sigma^{n'} \\ \exp(\beta\sigma) \\ \sinh(\alpha\sigma)^n \end{cases}, \quad (3)$$

где  $\varepsilon'$  – скорость деформации;  $A$ ,  $n'$ ,  $n$ ,  $\beta$ ,  $\alpha$  – константы материала,  $\alpha = \beta/n$ .

Для высоких и низких напряжений  $F(\sigma)$  в уравнении (3) принимает следующие виды, соответственно:

$$F(\sigma) = B\sigma^{n'}, \quad (4)$$

$$F(\sigma) = C \cdot \exp(\beta\sigma), \quad (5)$$

где  $B$  и  $C$  – константы материала.

Прологарифмировав уравнения (4) и (5), были получены линейные уравнения вида:

$$\ln(\sigma) = \frac{1}{n'} \ln(\varepsilon') - \frac{1}{n'} \ln(B), \quad (6)$$

$$\sigma = \frac{1}{\beta} \ln(\varepsilon') - \frac{1}{\beta} \ln(C). \quad (7)$$

Используя экспериментальные данные значений сопротивления деформации при данных скоростях и температурах испытания, можно определить соответствующие коэффициенты  $n'$  и  $\beta$  линейных уравнений (6) и (7) по углу наклона эмпирических зависимостей:

$$n' = \left[ \frac{\partial \ln(\dot{\varepsilon})}{\partial \ln(\sigma)} \right]_T \quad (8)$$

$$\beta = \left[ \frac{\partial \ln(\dot{\varepsilon})}{\partial \sigma} \right]_T \quad (9)$$

Полученные значения для сплава 1  $n' = 45,57$  и  $\beta = 0,4843 \text{ МПа}^{-1}$  дают значение  $\alpha$  равное  $0,0106 \text{ МПа}^{-1}$ . Для всех уровней напряжений уравнение (2) имеет вид:

$$\varepsilon' = A \cdot \sinh(\alpha\sigma)^n \cdot \exp\left(\frac{-Q}{R \cdot T}\right) \quad (10)$$

Прологарифмировав его, получаем:

$$\ln[\sinh(\alpha\sigma)] = \frac{1}{n} \ln(\varepsilon') - \frac{1}{n} \ln(A) + \frac{Q}{nRT} \quad (11)$$

Для каждого значения скорости деформации значение  $Q$  равно:

$$Q = Rn \frac{d\{\ln[\sinh(\alpha\sigma)]\}}{d(1/T)} \quad (12)$$

Полученные значения энергии активации для сплава 1 лежит в интервале 114–150 кДж/моль, что совпадает с значениями энергии активации в литературе. Небольшие отклонения могут быть связаны с закреплением дислокаций.

Полученные значения энергии активации и констант для сплавов 1, 2 и 3 приведены ниже в табл. 1–3 соответственно.

Таблица 1

Константы материалов и энергии активации для сплава 1

$\varepsilon', \text{с}^{-1}$	$n'$	$\beta, \text{МПа}^{-1}$	$\alpha, \text{МПа}^{-1}$	$n$	$Q, \text{кДж/моль}$
0,01	4,5	0,048	0,0107	3,5	149
0,1					147
1					114
10					115

Таблица 2

## Константы материалов и энергии активации для сплава 2

$\dot{\epsilon}', \text{с}^{-1}$	$n'$	$\beta, \text{МПа}^{-1}$	$\alpha, \text{МПа}^{-1}$	$n$	$Q, \text{кДж/моль}$
0,01	309	0,043	0,011	3,9	168
0,1					159
1					125
10					125

Таблица 3

## Константы материалов и энергии активации для сплава 3

$\dot{\epsilon}', \text{с}^{-1}$	$n'$	$\beta, \text{МПа}^{-1}$	$\alpha, \text{МПа}^{-1}$	$n$	$Q, \text{кДж/моль}$
0,01	3,5	0,041	0,0117	4,1	176
0,1					172
1					154
10					148

Посчитав константы материала, можно составить модель напряжения течения от деформации. Таким образом, основное уравнение, связывающее напряжение и параметр Зинера – Холломона может быть представлено в виде:

$$\sigma = \frac{1}{\alpha} \ln \left\{ \left( \frac{Z}{A} \right)^{\frac{1}{n}} + \left[ \left( \frac{Z}{A} \right)^{\frac{2}{n}} + 1 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}, \quad (40)$$

$$AARE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{\sigma_s - \sigma_p}{\sigma_s} \right| \times 100. \quad (41)$$

где  $\sigma_s$  и  $\sigma_p$  – экспериментальные и расчетные значения напряжений.

Относительная погрешность (AARE) данной модели составила 11,39 %.